综　　述 DOI: 10.11724/jdmu.2026.03.11

多模态 MRI 在腕管综合征正中神经评估中的应用进展

苏奉祎，尤壮志

（内蒙古医科大学第二附属医院 医学影像科，内蒙古 呼和浩特 010000）

［摘要］ 近年来，腕管综合征（CTS）的发病率呈逐渐升高趋势，其诊断与预后评估是临床面临的重要挑战。磁共振成像（MRI）能够从腕关节结构、功能、活性及组织定量等方面提供全面信息，在 CTS 的临床检查中发挥重要作用。常规 MRI 技术在 CTS 中可通过形态学、横截面积等指标实现基础诊断；而磁共振弥散张量成像（DTI）、三维双回波稳态序列（3D-DESS）、T2 弛豫时间定量成像（T2-mapping）等高级 MRI 技术在揭示正中神经微观结构变化、精准定位卡压部位、量化水肿病理改变等方面具有独特优势。本文系统综述了多模态 MRI 影像技术在诊断 CTS 中的应用进展，旨在提高对 CTS 病变的认识，为 CTS 未来的研究和临床诊疗提供有价值的影像学依据。

［关键词］ 腕管综合征；正中神经；磁共振成像；磁共振弥散张量成像；三维双回波稳态序列；T2 弛豫时间定量成像；人工智能

［中图分类号］ R445　［文献标志码］ A　文章编号：1671-7295(2026)03-0265-05

Advances in the application of multimodal MRI for evaluating the median nerve in carpal tunnel syndrome

SU Fengyi, YOU Zhuangzhi

(*Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot* 010000, *China*)

［**Abstract**］ In recent years, the incidence of carpal tunnel syndrome (CTS) has shown a gradual increase, and its diagnosis and prognostic assessment remain significant challenges in clinical practice. Magnetic resonance imaging (MRI) provides comprehensive information on various aspects of the wrist joint, including structure, function, activity and tissue quantification, and plays a vital role in the clinical evaluation of CTS. Conventional MRI techniques can facilitate basic diagnosis of CTS through morphological features and cross-sectional area measurements; whereas advanced MRI techniques such as diffusion tensor imaging (DTI), three-dimensional double-echo steady state (3D-DESS) and T2 relaxation time mapping (T2-mapping) offer unique advantages in revealing microstructural changes in the median nerve, precisely localizing sites of compression and quantitatively assessing edema-related pathological changes. This article provides a systematic review of the advances in the application of multimodal MRI imaging techniques in the diagnosis of CTS, aiming to enhance understanding of CTS and to provide valuable radiological evidence for future research and clinical management of CTS.

［**Keywords**］ carpal tunnel syndrome; median nerve; magnetic resonance imaging; DTI; 3D-DESS; T2-mapping; artificial intelligence

腕管综合征（carpal tunnel syndrome, CTS）是手外科中最常见的周围神经卡压综合征。其发病机制为：各种急性或慢性原因导致腕管内压力升高，进而压迫腕管内的正中神经，产生相应的症状或体征。主要的临床表现为正中神经支配区（第 1～3 指及第 4 指桡侧半）疼痛、麻痹及感觉异常，同时伴或不伴肌力减退，严重者可出现鱼际区肌肉萎缩、拇指对掌功能受损[1-3]。

肌电图虽被视为 CTS 诊断的“金标准”，但其局限性显著，仅能反映神经生理功能异常，而无法精确定位

第一作者简介：苏奉祎（1999—），女，硕士研究生。E-mail: 15044899107@qq.com

通信作者：尤壮志，主任医师。E-mail: yzhuangzhi99@163.com

神经卡压位置、量化压迫程度或揭示潜在病因[4-5]。磁共振神经显像(magnetic resonance neurography, MRN)是一种重心成像技术, 可通过神经与背景的高对比度实现精确的神经显像。MRN 具有较高的空间分辨率, 不仅可识别神经, 还能提供其独特解剖特征的详细信息[6]。尽管近年来关于 CTS 与多模态磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术的结合研究数量丰富, 但缺乏系统性的归纳和整理。本文就近年来多模态 MRI 技术对 CTS 患者正中神经改变及其机制的研究现状展开综述, 旨在为 CTS 未来的研究和临床诊疗提供有价值的参考和指导。

1 常规 MRI 技术在 CTS 中的应用

正中神经在进入腕管时受到卡压而发生增粗、肿胀, 这些表现在 T1WI、T2WI 图像中均可以观察到, 尤其在豌豆骨层面, T2WI 表现最为明显[7]。在 T2WI 图像中, 正中神经、腕横韧带和腕管肌腱滑膜的信号明显增高, 这可能是由于正中神经缺氧、毛细血管压力升高和水肿所致[8]。质子密度加权成像(proton density weighted imaging, PDWI)序列是一般肌肉骨骼成像的标准序列, 该序列具有抗伪影能力强、成像速度快、操作简便、灵活的特点, 通常作为腕关节的常规扫描序列[9]。在横断位 PDWI 图像上测量正中神经横截面积(cross-sectional area, CSA)是评估 CTS 的重要指标。众多研究表明, CSA 是诊断 CTS 最有价值的 MRI 指标: 当腕管入口近端或出口远端的 CSA＞15 mm^2 时, 诊断准确性较高, 且能有效区分轻、中、重度 CTS——这些测量值均可通过横断位 PDWI 序列清晰评估[5, 10]。然而, 单纯依靠 PDWI 序列仅能显示腕管内正中神经的局部形态, 无法完整反映其全程形态及神经受损情况; 因此, 常需要结合 3D-MRI、磁共振弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)等序列, 以获取解剖形态以外的功能信息。

2 高级 MRI 技术在 CTS 中的应用

2.1 DTI

近年来, 随着 MRI 技术的发展, DTI 已成为评估周围神经病变的重要工具。DTI 技术的优势在于其能够无创地通过定量参数的改变来识别组织中的微观结构变化[11]。在周围神经病变中, DTI 指标优于标准形态学成像, 且不受年龄和采集参数的影响。此外, DTI 还可以与其他 MRI 数据相结合, 如形态学扫描、无对比度血管造影等, 以确定周围神经手术后是否存在中枢再生能力[12]。DTI 主要通过测量水分子在组织中的扩散特性来评估微观结构。在周围神经中, 由于神经纤维束呈平行排列, 水分子主要沿神经长轴方向扩散, 因而表现出明显的各向异性[13]。

DTI 通常生成包括分数各向异性(fractional anisotropy, FA)、平均扩散率(mean diffusivity, MD)、轴向扩散率(axial diffusivity, AD)和径向扩散率(radial diffusivity, RD)等指标。其中, FA 值是衡量水分子扩散各向异性的标量, 其值介于 0 和 1 之间, FA 为 0 意味着水在体素内的各向同性扩散, 而 FA 为 1 则意味着沿单轴扩散, 即沿神经长度的双向扩散。MD 表示体素内水分子的平均扩散速率, 而 AD 和 RD 分别表示沿神经轴和垂直于神经轴的扩散速率。在 DTI 的定量分析中, FA 值和表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)值是常用的参数。有研究指出, 健康成年人正中神经平均 FA 值介于 0.48～0.71 之间, 当 FA 值低于 0.48 时, 提示正中神经损伤的可能性大[14-15]。Vo 等[16-17] 研究发现, 以 0.45 为截断值时, FA 是 CTS 诊断的最佳预测因子, 具有 90% 的敏感性、84.6% 的特异性和 92.1% 的准确性, 表明豌豆骨水平的正中神经 FA 值在 CTS 的诊断中具有较高的效能。Rojoa 等[12] 的一项 DTI 对 CTS 的诊断荟萃分析显示, 在重度急性压迫状态下, 神经内水肿明显, 通常表现为 FA 值降低, MD 和 RD 值增加; 而在慢性压迫情况下, 则可能因神经纤维化导致水分减少, 从而表现为 MD 值降低, FA 值则可能出现升高。这些参数的变化特征对于 CTS 的临床诊断和治疗方案制定具有重要意义。有研究者评估了术前和术后正中神经结构变化与 CTS 患者症状、功能状态和电生理参数的相关性, 发现术后近端 FA 值提升与临床改善相关, 但 ADC 值变化不显著, 表明 FA 值是评估正中神经结构变化的有用生物标志物, 可通过分析 FA 变化来预测症状改善情况[18]。DTI 技术同样能够系统揭示 CTS 引发的中枢神经系统改变机制。Xue 等[19] 研究发现, CTS 患者存在广泛的脑白质微结构重组; 患者优势半球中央外侧皮质和辅助运动区的 FA 值显著高于健康志愿者, 提示这些区域的白质纤维束发生了适应性改变, 这种结构重塑可能与长期外周神经卡压导致的中枢代偿有关。

因此, DTI 技术提供的定量参数既可直接评估外周神经损伤程度, 又可间接反映中枢神经系统的代偿性改变, 有助于从外周-中枢整体视角探讨 CTS 的发病机制、评估患者预后, 对指导临床治疗具有重要的应用价值。

2.2 三维双回波稳态序列(three-dimensional double-echo steady state, 3D-DESS)

3D-DESS 序列通过合并稳态进动快速成像序列

及其时间反转序列的信号，获得 T1 与重 T2 双重加权效果，前者主要产生 T1 加权效果以突出解剖细节，后者主要产生重 T2 加权效果以突出长 T2 液体信号。其优势在于能够清晰显示液体信号，同时减少血流搏动和呼吸运动的影响，从而精细显示解剖细节。3D-DESS 在信噪比和图像质量方面表现优异，冠状面采集可获得更为细腻的神经影像，使其在腰神经、软骨损伤等诊断中成为有力工具[20]。该技术的三维采集可在可接受扫描时间内提供各向同性高空间分辨率，并可进行多平面重建，实现三维视角观察神经卡压位置，对术前评估病情具有重要意义[21]。

3D-DESS 在腮腺肿瘤定位中的应用效果确切。Jeong 等[22] 和 Kim 等[23] 的研究显示，术前采用 3D-DESS 对肿瘤与面神经相对位置进行定位，准确率可达 90.8%，且显著缩短了术中识别面神经的时间。这一成果验证了该序列在神经精细解剖显示中的可靠性，也为将其应用于其他周围神经提供了依据。在臂丛神经显像方面，王国松等[24] 对 3D-DESS 与三维短时反转恢复快速自旋回波成像（3D short inversion time inversion recovery sampling perfection with application optimized contrasts using different flip angle evolutions, 3D-STIR-SPACE）序列进行了比较，发现 3D-DESS 平扫对臂丛神经根段的显示效果仅次于增强后的 3D-STIR-SPACE，这表明在不使用对比剂的情况下，3D-DESS 仍具备较高的诊断效能，对外伤性臂丛神经损伤的评估具有重要价值。针对脊柱区域微小神经结构，3D-DESS 序列同样展现出独特优势。有研究者在高场强成像中发现，3D-DESS 可使脑脊液呈暗色，从而显著增强小神经根与背景的对比度，这一特性使其在检测神经根撕脱等微小损伤时较 CT 平扫更为敏感[25-26]。Liu 等[27] 的研究也证实，相比 CT 平扫，3D-DESS 能更清晰地呈现全景图像，提供更多诊断信息。

在既往研究基础上，Maki 等[28] 将 DTI 与 3D-DESS 联合应用于 CTS 评估，结果显示，3D-DESS 可清晰显示正中神经的肿胀形态，结合 DTI 的定量参数，为 CTS 的精准诊断和预后评估提供了更全面的影像学依据。未来应进一步探索 3D-DESS 在 CTS 中的定量评估价值，以期在疗效判定和疾病进展预测方面发挥更大作用。

2.3 T2 弛豫时间定量成像（T2 relaxation time mapping, T2-mapping）

T2-mapping 序列可定量测量组织 T2 弛豫时间，其工作原理是采用固定重复时间与多回波自旋回波序列进行数据采集，通过计算机拟合准确获取组织的 T2 值，该序列对组织内含水微环境的变化具有高度敏感性，可精确定量正中神经不同区域的 T2 信号强度，从而揭示水分含量的异常改变[29-30]。寇梦琪等[31] 创新性地将 T2 mapping 技术应用于周围神经的定量评估，证实该序列在糖尿病周围神经病变中较常规 T2WI 序列更能客观地反映神经组织的信号变化，并且能更好地评估坐骨神经和腓神经中神经轴突的病理变化。目前认为 CTS 的病理生理机制为：腕管内持续升高的压力阻碍毛细血管循环，导致局部组织缺氧，进而损伤毛细血管内皮结构，引发蛋白质渗出及神经水肿。针对这一病理改变，Martín-Noguerol 等[30] 将 T2-mapping 应用于 CTS 患者，结果显示腕管近端区域正中神经的 T2 值显著增高，证实该技术可有效检测并量化正中神经的水肿程度。此外，Kondo 等[32] 对 CTS 患者手术前后进行测量发现，术后正中神经 T2 值显著下降，近端腕管水平从术前的 56.3 ms 降至 46.9 ms。上述研究表明，T2-mapping 可对 CTS 进行定量评估，既可辅助诊断，也可监测术后恢复，是评估神经损伤程度及预后的重要影像学指标。

2.4 人工智能辅助 MRI 技术在 CTS 中的应用

人工智能在 CTS 诊断方面展现出巨大潜力，可显著提升精准度和效率。目前已有多种算法被开发用于辅助诊断，包括超声、MRI、神经传导研究及红外热成像[33]。在 MRI 领域，Deep CTS 是一种专门针对腕管设计的深度学习算法，由基于简单卷积神经网络的形状分类器和采用简化 U-Net 的腕管区域分割器组成。Zhou 等[4] 的测试结果显示，Deep CTS 在腕管区域分割中表现出较高的准确率，提示深度学习可有效提升 MRI 图像分析效率。在成像技术层面，Lin 等[34] 研究表明，3D-DESS 序列凭借其固有的运动敏感性，可在提供 T2 对比度的同时抑制血管信号，从而清晰显示神经病变。双层图基图像组合（dual layer graph-based image combination, DL-GIC）重建技术是一种基于深度学习的图像后处理方法，通过优化多通道线圈数据的组合权重，可有效提升图像信噪比和空间分辨率。当 3D-DESS 序列与 DL-GIC 重建技术联合应用时，神经形态显示效果较二维高分辨率序列显著提升，可更清晰地呈现神经结构，在神经病变评估中展现出良好的应用前景。总之，人工智能在 CTS 诊断中的作用日益凸显，既可作为提升诊断准确率的辅助工具，又能为短期临床预后提供可靠的预测依据。

3 小结与展望

综上所述，多模态 MRI 从不同维度为 CTS 评估提供了互补性信息——常规 MRI 凭借正中神经横截

面积测量, 适用于基础诊断与严重程度分级; DTI 通过 FA 等定量参数灵敏捕捉神经微观结构改变, 有助于区分病程阶段及评估预后; T2-mapping 将神经水肿量化为具体数值, 既可辅助诊断也可动态监测术后恢复情况; 3D-DESS 凭借各向同性高分辨率实现卡压点精准定位, 为术前评估提供直观解剖依据; 人工智能的融入则为多模态数据的整合分析提供了更高效的工具。此外, 相关 MRI 研究还揭示了 CTS 患者的中枢神经系统重塑机制, 将传统上被视为单纯局部卡压的疾病, 拓展为外周神经损伤与中枢代偿改变相互关联的新认识。Sobeeh 等[35] 的研究证实, CTS 患者初级感觉皮层存在手指代表区分离距离缩短等结构功能改变; Lu 等[36] 则发现了感觉皮层自发活动减弱而辅助运动区代偿增强的“局部去激活、远端代偿”模式, 且治疗后具有一定可逆性。未来随着中枢重塑机制研究的深入, 有望从中枢层面识别疾病早期高危人群、预测外周干预效果, 并指导中枢靶向治疗与外周手术的联合应用, 推动 CTS 诊疗向更精准的“外周-中枢整体评估”模式发展。

当前研究仍面临诸多挑战: 多数研究为小样本、单中心、横断面设计, 且主要聚焦单一模态, 限制了结果的普遍性与可靠性。而且腕部 MRI 在儿童中的应用尤其困难, 如高成本、检查时间长及对运动伪影敏感等。未来应致力于开发快速成像序列或低场强便携式设备以提升儿童及特殊人群适用性[37-38]; 应用高场强 MRI 及 24 通道专用手部线圈, 实现不同姿势下的运动学成像, 提供更全面的诊断依据[39-40]; 推动人工智能与影像组学技术融合, 实现多模态数据的快速处理与精准预测; 开展大样本纵向研究, 验证各技术指标的临床价值。随着多模态 MRI 技术的快速发展, 其在 CTS 精准诊断、疗效判定及预后评估中的作用将得到进一步证实。

参考文献:

[1] 薛超, 徐克钢, 李永平. 腕管综合征诊治研究进展 [J]. 国际骨科学杂志, 2024, 45(2): 100-104. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2024.02.005.

[2] 周泽惠, 战杰. 腕管综合征病因学的研究进展 [J]. 实用手外科杂志, 2023, 37(1): 117-119. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2722.2023.01.032.

[3] Ng AWH, Griffith JF, Ng ISH. MRI of carpal tunnel syndrome: before and after carpal tunnel release[J]. Clin Radiol, 2021, 76(12): 940. e29-940. e35. DOI: 10.1016/j.crad.2021.07.015.

[4] Zhou HY, Bai Q, Hu XL, et al. Deep CTS: a deep neural network for identification MRI of carpal tunnel syndrome[J]. J Digit Imag, 2022, 35(6): 1433-1444. DOI: 10.1007/s10278-022-00661-4.

[5] Bagga B, Sinha A, Khandelwal N, et al. Comparison of magnetic resonance imaging and ultrasonography in diagnosing and grading carpal tunnel syndrome: a prospective study[J]. Curr Probl Diagn Radiol, 2020, 49(2): 102-115. DOI: 10.1067/j.cpradiol.2019.04.004.

[6] dos Santos Silva J, de Barros LFP, de Freitas Souza R, et al. "Million dollar nerve" magnetic resonance neurography: first normal and pathological findings[J]. Eur Radiol, 2022, 32(2): 1154-1162. DOI: 10.1007/s00330-021-08213-0.

[7] 黄昀桀, 陈兵, 杨顺, 等. 腕管综合征 MRI 征象及其与临床特征的相关性 [J]. 西部医学, 2021, 33(4): 615-619. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2021.04.030.

[8] 王丽芸, 丛雪, 邱逦. 腕部支持带的影像学研究进展 [J]. 临床超声医学杂志, 2023, 25(1): 54-57. DOI: 10.16245/j.cnki.issn1008-6978.2023.01.019.

[9] Rehnitz C, Klaan B, von Stillfried F, et al. Comparison of modern 3D and 2D MR imaging sequences of the wrist at 3 tesla[J]. Rofo, 2016, 188(8): 753-762. DOI: 10.1055/s-0042-104512.

[10] Ng AWH, Griffith JF, Tong CSL, et al. MRI criteria for diagnosis and predicting severity of carpal tunnel syndrome[J]. Skeletal Radiol, 2020, 49(3): 397-405. DOI: 10.1007/s00256-019-03291-0.

[11] 唐玲, 程捷飞. 采用扩散张量成像定量研究及纤维束示踪成像观察正常腕关节正中神经 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2020, 18(10): 154-156. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2020.10.046.

[12] Rojoa D, Raheman F, Rassam J, et al. Meta-analysis of the normal diffusion tensor imaging values of the Median nerve and how they change in carpal tunnel syndrome[J]. Sci Rep, 2021, 11: 20935. DOI: 10.1038/s41598-021-00353-z.

[13] 康佳敏, 吴文骏, 郑传胜, 等. 增强磁共振神经成像显示正常腕掌部正中神经、尺神经及分支的价值 [J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(9): 1631-1635. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2022.09.042.

[14] 宋希根, 严高武, 杨国庆, 等. MRI 扩散张量成像对腕管综合征的诊断价值 [J]. 临床放射学杂志, 2020, 39(3): 551-554. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2020.03.028.

[15] Pušnik L, Serša I, Umek N, et al. Correlation between diffusion tensor indices and fascicular morphometric parameters of peripheral nerve[J]. Front Physiol, 2023, 14: 1070227. DOI: 10.3389/fphys.2023.1070227.

[16] Vo NQ, Nguyen DD, Hoang NT, et al. Magnetic resonance imaging as a first-choice imaging modality in carpal tunnel syndrome: new evidence[J]. Acta Radiol, 2023, 64(2): 675-683. DOI: 10.1177/02841851221094227.

[17] Vo NQ, Hoang NT, Nguyen DD, et al. Quantitative parameters of diffusion tensor imaging in the evaluation of carpal tunnel syndrome[J]. Quant Imaging Med Surg, 2022, 12(6): 3379-

3390. DOI: 10.21037/qims-21-910.

[18] Pinto da Silva FH, dos Santos Silva J, Pereira de Barros LF, et al. Use of diffusion tensor imaging as a prognostic biomarker after decompression surgery for carpal tunnel syndrome[J]. Acta Radiol, 2023, 64(3): 1109-1115. DOI: 10.1177/02841851221113518.

[19] Xue X, Wu JJ, Hua XY, et al. Structural white matter alterations in carpal tunnel syndrome: a modified TBSS study[J]. Brain Res, 2021, 1767: 147558. DOI:10.1016/j.brainres.2021.147558.

[20] 王祺, 李会侠, 赵朝晖, 等. 3.0T 3D-DESS 优化序列技术联合运动神经根传导时间对神经根型颈椎病诊断效能及临床意义 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(3): 158-161. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2024.03.048.

[21] Funahashi T, Suzuki T, Hayakawa K, et al. Visualization of the morphological changes in the Median nerve after carpal tunnel release using three-dimensional magnetic resonance imaging [J]. Eur Radiol, 2022, 32(5): 3016-3023. DOI: 10.1007/s00330-021-08447-y.

[22] Jeong HS, Kim Y, Kim HJ, et al. Imaging of facial nerve with 3D-DESS-WE-MRI before parotidectomy: impact on surgical outcomes[J]. Korean J Radiol, 2023, 24(9): 860. DOI: 10.3348/kjr.2022.0850.

[23] Kim Y, Jeong HS, Kim HJ, et al. Three-dimensional double-echo steady-state with water excitation magnetic resonance imaging to localize the intraparotid facial nerve in patients with deep-seated parotid tumors[J]. Neuroradiology, 2021, 63(5): 731-739. DOI: 10.1007/s00234-021-02673-3.

[24] 王国松, 邵静松, 江茜, 等. 3D-DESS 与 3D-STIR-SPACE 序列在外伤性臂丛神经显示中的临床价值 [J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(11): 2095-2098. DOI: 10.20258/j.cnki.1006-9011.2023.11.038.

[25] Galley J, Sutter R, Germann C, et al. High-resolution in vivo MR imaging of intraspinal cervical nerve rootlets at 3 and 7 Tesla[J]. Eur Radiol, 2021, 31(7): 4625-4633. DOI: 10.1007/s00330-020-07557-3.

[26] Warburton C, Cabrera C, Perez O, et al. Identifying anatomic landmarks and Median nerve characteristics for the analysis of persistent carpal tunnel syndrome using magnetic resonance imaging (MRI)[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53(2): 299-305. DOI: 10.1007/s00256-023-04397-2.

[27] Liu W, Chen JH, Zhang YN, et al. Diagnostic values of 2 different techniques for controversial lumbar disc herniation by conventional imaging examination: 3D-DESS vs. CT plain scan[J]. Front Physiol, 2022, 13: 953423. DOI: 10.3389/fphys.2022.953423.

[28] Maki Y, Takayama M, Okawa T, et al. Diffusion tensor imaging combined with the dual-echo steady-state (DESS) protocol for the evaluation of the Median nerve in the carpal tunnel: a preliminary study[J]. Surg Neurol Int, 2024, 15: 110. DOI: 10.25259/SNI_156_2024.

[29] Maeda A, Suzuki T, Hayakawa K, et al. T2 mapping of the Median nerve in patients with carpal tunnel syndrome and healthy volunteers[J]. Muscle Nerve, 2021, 63(5): 774-777. DOI: 10.1002/mus.27205.

[30] Martín-Noguerol T, Casado-Verdugo OL, Beltrán LS, et al. Role of advanced MRI techniques for sacroiliitisassessment and quantification[J]. Eur J Radiol, 2023, 163: 110793. DOI: 10.1016/j.ejrad.2023.110793.

[31] 寇梦琪, 杨玉林, 黄国权, 等. 3.0T MRI 下肢神经 T2 mapping 和弥散张量成像定量诊断 2 型糖尿病周围神经病变的临床价值 [J]. 医学影像学杂志, 2025, 35(9): 121-125,130. DOI: 10.20258/j.cnki.1006-9011.2025.09.025.

[32] Kondo H, Suzuki T, Hayakawa K, et al. T2 magnetic resonance imaging mapping and morphology of the Median nerve before and after surgery in carpal tunnel syndrome[J]. Muscle Nerve, 2024, 70(3): 346-351. DOI: 10.1002/mus.28191.

[33] Misch M, Medani K, Rhisheekesan A, et al. Artificial Intelligence and Carpal Tunnel Syndrome: a systematic review and contemporary update on imaging techniques[J]. Hand Surg Rehabil, 2025, 44(5): 102264. DOI: 10.1016/j.hansur.2025.102264.

[34] Lin Y, Tan ET, Campbell G, et al. Improved 3D DESS MR neurography of the lumbosacral plexus with deep learning and geometric image combination reconstruction[J]. Skeletal Radiol, 2024, 53(8): 1529-1539. DOI: 10.1007/s00256-024-04613-7.

[35] Sobeeh MG, Benmelouka A, Metwally E, et al. Altered brain function and structure in carpal tunnel syndrome: a systematic review and meta-analysis of structural and functional brain imaging[J]. Brain Struct Funct, 2024, 229(2): 257-272. DOI: 10.1007/s00429-023-02737-5.

[36] Lu YC, Zhang H, Zheng MX, et al. Local and extensive neuroplasticity in carpal tunnel syndrome: a resting-state fMRI study[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2017, 31(10-11): 898-909. DOI: 10.1177/1545968317723749.

[37] Ratasvuori MS, Lindfors NC, Sormaala MJ. The clinical significance of magnetic resonance imaging of the hand: an analysis of 318 hand and wrist images referred by hand surgeons[J]. J Plast Surg Hand Surg, 2022, 56(2): 69-73. DOI: 10.1080/2000656X.2021.1933993.

[38] Awais K, Snoj Ž, Cvetko E, et al. Diffusion tensor imaging of a Median nerve by magnetic resonance: a pilot study[J]. Life, 2022, 12(5): 748. DOI: 10.3390/life12050748.

[39] Sneag DB, Abel F, Potter HG, et al. MRI advancements in musculoskeletal clinical and research practice[J]. Radiology, 2023, 308(2): e230531. DOI: 10.1148/radiol.230531.

[40] Zhang B, Wang BL, Ho J, et al. Twenty-four–channel high-impedance glove array for hand and wrist MRI at 3T[J]. Magn Reson Med, 2022, 87(5): 2566-2575. DOI: 10.1002/mrm.29147.

（收稿日期：2025-11-26；修回日期：2026-03-18）

责任编辑：李雅楠